

Influence of transverse rebars on bond between steel reinforcement and cellular concrete with very low compressive strength

Influência do uso de barras transversais soldadas na aderência aço-concreto celular de baixíssima resistência à compressão

P. R. N. SOUDAIS^a
pierre.engenharia@gmail.com

J. S. CAMACHO^a
jef@dec.feis.unesp.br

G. A. PARSEKIAN^b
parsekian@ufscar.br

Abstract

Cellular concrete is a lightweight concrete obtained by aerating agent, which produces air-voids into the mixture. This work deals with bond between cellular concrete and steel rebars. Pull-out tests of 4,2 mm diameter rebars partly immersed into concrete cylinders were made. Concrete unit weight variation and setting of a transverse rebar into the concrete cylinder center constitute the variables of the work. Three types of mixture were prepared: one without aerating agent (with a dry unit weight of 2255 kg/m³), and two with different aerating agent rates (with a dry unit weight equal to 1565 and 1510 kg/m³). The study revealed the large decrease of bond stress between 4,2 diameter rebars and cellular concrete, due to concrete unit weight reduction. Transverse rebar introduced into concrete cylinder center increased the ultimate pull-out force of the test: the gain of bond produced by the transverse rebar grew up when the cellular concrete unit weight had been reduced. Therefore, special anchorages (not exclusively straight), permitting bond improvement between cellular concrete and rebars could be a solution to improve the mechanical performance of cellular concrete.

Keywords: cellular concrete, bond stress, anchoring.

Resumo


O concreto celular, que se caracteriza por ter um peso próprio reduzido pela incorporação artificial de ar, pode constituir uma alternativa sustentável ao concreto comum nas estruturas de pequeno e médio porte. O presente trabalho trata da avaliação da aderência entre o concreto celular e as barras de aço. Foram realizados ensaios de arrancamento com barras de diâmetro igual a 4,2 mm, parcialmente imersas em corpos-de-prova cilíndricos de concreto. A taxa de agente espumígeno no concreto e a presença ou não de uma barra transversal dentro do cilindro, simulando uma condição mais próxima ao uso de tela de aço, constituem as variáveis da pesquisa. Foram utilizadas três dosagens de concreto, com massa específica aparente de 2255, 1565 e 1510 kg/m³. Pelo arrancamento de barras simples de diâmetro igual a 4,2 mm, notou-se o forte decréscimo da tensão de aderência junto com o rebaixamento da massa específica aparente do concreto. A barra transversal permitiu obter um ganho de resistência ao arrancamento da barra longitudinal, que cresceu junto com o rebaixamento da massa específica do concreto celular. Assim, a utilização de ancoragens especiais (não exclusivamente retas), pode se tornar uma solução para melhorar o desempenho mecânico do concreto celular.

Palavras-chave: concreto celular, aderência, ancoragem.

^a Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Faculdade de Engenharia, Departamento de Engenharia Civil, Ilha Solteira, SP, Brasil;

^b Universidade Federal de São Carlos, Departamento de Engenharia Civil, São Carlos, SP, Brasil.

Received: 26 Sep 2016 • Accepted: 11 Jan 2018 • Available Online:

 This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License

1. Introdução

Apesar de suas numerosas vantagens (boa trabalhabilidade no estado fresco e boa resistência à maioria das solicitações no estado endurecido, entre outros), o concreto armado convencional apresenta como principal desvantagem o fato de ter uma elevada relação entre massa específica e resistência, o que aumenta o peso próprio das estruturas e dificulta o manuseio de elementos pré-fabricados. Outra desvantagem do concreto armado convencional é que ele é bom condutor de calor e som, o que exige a combinação com materiais adicionais para melhorar o desempenho térmico e acústico quando aplicado em edificações (CARVALHO; FIGUEIREDO FILHO [1]). A redução da densidade do concreto permite limitar essas desvantagens. Conforme as indicações da ABNT NBR 8953:2015 [2], o concreto é dito leve quando a sua massa específica é inferior a 2000 kg/m^3 . Uma das maneiras de aumentar a leveza do concreto é substituir uma parte dos materiais sólidos por ar (ROSSIGNOLO [3]). A incorporação de ar nos concretos leves afeta a resistência mecânica do material, mas aumenta o seu desempenho como isolante térmico e acústico. Por isso, no caso de edificações recebendo poucos esforços na estrutura e necessitando uma boa isolamento térmica e acústica (caso, por exemplo, das casas e dos edifícios residenciais baixos), os concretos leves podem ter uma utilização estrutural e tornar-se uma alternativa ao concreto armado convencional. O concreto armado tem um bom desempenho estrutural, pois o concreto (resistente à compressão) trabalha solidariamente junto com o aço (resistente à tração). Essa solidariedade é garantida pela existência da aderência entre os dois materiais, equivalente à transmissão do esforço resistido pelo aço para o concreto (CARVALHO; FIGUEIREDO FILHO [1]). Para ter uma função estrutural, um elemento em concreto armado deve, portanto, ter as melhores condições de aderência possíveis entre o aço e o concreto (convencional ou leve). Neste contexto, estudar o fenômeno de aderência (realizando ensaios de arrancamento) entre armaduras de aço e um tipo de concreto leve (nesta pesquisa, o concreto celular) para avaliar a utilização estrutural do material composto obtido é relevante.

2. Revisão bibliográfica

2.1 Concreto celular

A ABNT NBR 8953:2015 [2] define três categorias de concreto segundo a massa específica aos 28 dias (γ_{28}): o concreto leve ($\gamma_{28} < 2000 \text{ kg/m}^3$), o concreto normal ($2000 \text{ kg/m}^3 < \gamma_{28} < 2800 \text{ kg/m}^3$) e o concreto pesado ($\gamma_{28} > 2800 \text{ kg/m}^3$). O concreto leve pode ser de três tipos: com agregados leves, sem finos ou celular (ROSSIGNOLO [3]). Apesar de as primeiras tentativas de elaboração de concretos celulares datarem do início do século XX (por exemplo, Eriksson na Suécia, considerado como precursor na área, patenteou um dos seus trabalhos em 1923), a disseminação do material na construção civil se tornou consequente apenas a partir da década de setenta, após o aprimoramento da química orgânica (FERREIRA [4]). Para os concretos celulares ditos "aerados", a porosidade pode ser obtida de duas maneiras. A primeira, chamada de "aeração química", pela reação entre os componentes da argamassa e um componente químico (por exemplo, pó de alumínio ou água oxigenada) geran-

do gases na mistura antes da pega do cimento (TEIXEIRA FILHO; TEZUKA [5]). A segunda, pela incorporação de um agente espumígeno na mistura. A incorporação do agente espumígeno na mistura também pode ser feito de duas formas. A primeira, preparando a espuma em equipamento específico e incorporado ela na mistura do concreto já pronta ("espuma pré-formada"). A segunda, gerando a espuma junto com os componentes do concreto, pela ação mecânica do misturador (TEIXEIRA FILHO; TEZUKA [5]). O processo de cura dito de autoclavagem permite melhorar as características mecânicas e reduzir a retração dos concretos celulares, através da submissão do material a condições especiais: temperatura entre $150 \text{ }^\circ\text{C}$ e $160 \text{ }^\circ\text{C}$, pressão entre 0,6 e 1,2 MPa (PETRUCCI [6]). Neste trabalho, o concreto celular utilizado é do tipo "aerado" com agente espumígeno diluído na água das misturas (a espuma foi gerada pela ação mecânica do misturador), não autoclavado. Daqui por diante esse concreto será denominado de "concreto celular". O concreto que não tem o agente espumígeno será denominado de "concreto convencional".

2.2 Conceito de aderência

Segundo Fusco [7], a aderência é composta por três parcelas: aderência por adesão, aderência por atrito e aderência mecânica. As ligações físico-químicas que se estabelecem na interface do aço e do concreto durante as reações de pega do cimento criam uma força resistente de adesão (aderência por adesão) que se opõe à separação dos dois materiais (FUSCO [7]). Uma vez rompida a adesão, para o menor deslocamento relativo, aparece uma resistência de atrito entre o aço e o concreto, desde que existam pressões transversais às armaduras. Essas pressões transversais podem ser causadas por tensões de compressão transversais devidas às cargas, pela retração ou pela expansão do concreto (LEONHARDT; MÖNNIG [8]). A aderência mecânica é decorrente da presença das nervuras na superfície das barras de aço, funcionando como peças de apoio e mobilizando tensões de compressão no concreto (FUSCO [7]). Na prática não é possível determinar cada uma das parcelas isoladamente (FUSCO [7]). Desse modo, por meio de ensaios, são determinados valores médios globais de aderência, que são suficientes para efeito de projeto, não havendo necessidade de um estudo em escala microscópica (FUSCO [7]). Nesta pesquisa foram determinados valores médios globais de aderência.

2.3 Ensaios de aderência com concretos leves

2.3.1 Piyamaikongdech [9]

Piyamaikongdech [9] desenvolveu um tipo de concreto celular a base de agente espumígeno e fibras de vidro, de massa específica teórica igual a 1450 kg/m^3 e de relação água/cimento em massa valendo 0,44. É importante mencionar que o concreto desenvolvido pelo autor não contém agregado graúdo, ao contrário do concreto desenvolvido nesta pesquisa. Ensaios de arrancamento de barras de aço de diâmetro de 12,7 mm foram realizados. Conforme mencionado pelo autor, as tensões últimas de aderência (τ_{bu}) obtidas vão de 1,06 MPa (para $\gamma_{28} = 1388 \text{ kg/m}^3$) até 4,11 MPa (para $\gamma_{28} = 1569 \text{ kg/m}^3$).

2.3.2 Oliveira [10]

Oliveira [10] estudou o fenômeno de aderência entre barras de aço de diâmetro 10 mm e concretos leves especiais. Para redução da massa específica do concreto no estado fresco (γ_0), foi utilizado, além de um agente espumígeno, resíduos plásticos e raspa de

pneu como substituição parcial do agregado graúdo. Variando o tipo de agregado e fixando a relação água/cimento em massa (0,61), as tensões últimas de aderência (τ_{bu}) encontradas vão de 0,84 MPa (para $\gamma_0 = 1779 \text{ kg/m}^3$) até 1,48 MPa (para $\gamma_0 = 1611 \text{ kg/m}^3$), sendo que τ_{bu} corresponde à média aritmética de dois corpos-de-prova, conforme apresentado por Oliveira [10].

Tabela 1

Caracterização dos agregados miúdo (AM) e graúdo (AG)

Característica	AM	AG
Massa específica aparente conforme NBR NM 52:2009 [11] e NBR NM 45:2006 [12] (g/cm^3)	1,59	1,48
Dimensão máxima característica conforme NBR NM 248:2003 [13] (mm)	1,18	9,50
Módulo de finura conforme NBR NM 248:2003 [13]	1,79	5,70

Tabela 2

Traços da pesquisa (Tr1, Tr2 e Tr3)

Componentes	Relação (em massa)
Cimento:Agr. miúd.:Agr. gra.	1:2,9:2,1
Água / Cimento	0,63
Fibras polip. / Água	0,0023
Aditivo plast. / Água	0,0083
MTr1: MTr2: MTr3	0:1:2

Note: M_{in} = massa de agente espumígeno no traço Tri

Tabela 3

Valores de γ_0 e γ_{28} para Tr1, Tr2 e Tr3 (kg/m^3)

CP	Tr1		Tr2		Tr3	
	γ_0	γ_{28}	γ_0	γ_{28}	γ_0	γ_{28}
1	2285	2282	1646	1576	1534	1471
2	2171	2180	1636	1560	1582	1528
3	2219	2228	1646	1569	1569	1512
4	2238	2235	1655	1579	1642	1579
5	2305	2308	1642	1557	1557	1487
6	2305	2314	1636	1557	1544	1477
7	2311	2317	1642	1566	1569	1493
8	2209	2209	1633	1563	1525	1458
9	2219	2219	1639	1557	1582	1522
10	-	-	-	-	1614	1553
11	-	-	-	-	1569	1509
12	-	-	-	-	1598	1534
M	2251	2255	1642	1565	1574	1510
DP	51	51	7	8	33	36
CV	2,27	2,27	0,41	0,54	2,12	2,35

Note: M = média aritmética (kg/m^3), DP = desvio padrão (kg/m^3), CV = coeficiente de variação (%)

Tabela 4

Resistência à compressão aos 28 dias (MPa)

Specimen	Mix1	Mix2	Mix3
1	25,73	2,48	1,39
2	21,80	2,46	1,58
3	29,81	2,58	1,40
4	26,17	2,65	1,91
5	24,00	2,49	1,74
6	22,08	2,72	1,37
7	-	-	1,40
f_{cm}	24,93	2,56	1,54
DP	2,99	0,11	0,21
CV	12,00	4,10	13,74

Note: f_{cm} = média aritmética (MPa), DP = desvio padrão (MPa), CV = coeficiente de variação (%)

3. Materiais da pesquisa

3.1 Componentes do concreto

Nesta pesquisa foram realizados três traços: Tr1 ($\gamma_{28} = 2255 \text{ kg/m}^3$, traço de referência), Tr2 ($\gamma_{28} = 1565 \text{ kg/m}^3$, traço com agente espumígeno) e Tr3 ($\gamma_{28} = 1510 \text{ kg/m}^3$, traço com agente espumígeno). A caracterização dos agregados miúdo (AM) e graúdo (AG) está apresentada na Tabela 1. O cimento utilizado é do tipo CP II-Z-32, conforme indicado pela ABNT NBR 11578:1991 [15] (cimento Portland composto contendo adição pozzolânica e de resistência à compressão mínima aos 28 dias de 32 MPa). Para os três traços, foi utilizado um aditivo plastificante polifuncional a base de naftaleno sulfonado, com alto poder de redução de água, massa específica de $1,19 \text{ g/cm}^3$, aparência líquida marrom escuro e isento de cloretos. Para obtenção do concreto celular (Tr2 e Tr3), foi utilizado um incorporador de ar de origem orgânica (protéica), com massa específica de $1,01 \text{ g/cm}^3$. Para limitar os efeitos da retração no concreto, foram utilizadas fibras de polipropileno nos três traços.

3.2 Armaduras

Para realização da armadura dos corpos-de-prova (CPs) foram utilizadas barras de aço do tipo CA-60 ($f_{yk} = 600 \text{ MPa}$) e de diâmetro nominal igual a 4,2 mm.

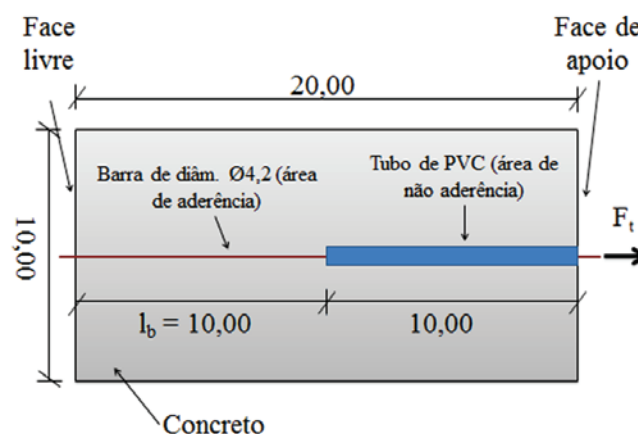
3.3 Dosagem e caracterização dos traços

A Tabela 2 apresenta a dosagem em massa dos traços da pesquisa, para $1,0 \text{ m}^3$ de concreto. O traço Tr1 não contém agente espumígeno, o traço Tr2 contém 50% da quantidade de agente espumígeno colocado no traço Tr3. Os CPs de caracterização dos traços foram moldados e curados conforme as recomendações da NBR 5738:2015 [16]. A Tabela 3 apresenta os valores de γ_0 e γ_{28} obtidos. A consistência dos concretos no estado fresco foi determinada pelo abatimento do tronco de cone, conforme as recomendações da

NBR NM 67:1998 [17]. Os abatimentos medidos para os traços Tr1, Tr2 e Tr3 foram de 140 mm, 215 mm e 260 mm, respectivamente. A determinação da resistência à compressão média aos 28 dias (f_{cm}) foi feita conforme as recomendações da NBR 5739:2007 [18]. Os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 4.

4. Programa experimental

Os ensaios realizados consistiram em arrancar barras simples de aço (CPs tipo "Barra") ou barras de aço dotadas de uma barra transversal soldada (CPs tipo "Tela") parcialmente imersa em um cilindro de concreto. Todas as barras de aço utilizadas na pesquisa têm um diâmetro nominal (\emptyset) de 4,2 mm. A moldagem dos CPs da pesquisa foi executada seguindo o mesmo processo aplicado aos CPs de caracterização (ver item 3.3). Durante o ensaio de arrancamento, a força de tração (F_t) e o deslocamento relativo entre o aço e o concreto (Δ) foram medidos.



Nota: l_b : comprimento de ancoragem longitudinal; F_t : força de arrancamento. Cotas em cm.

Figura 1
CP tipo "Barra" (corte longitudinal)

Tabela 5

Descrição das amostras da pesquisa

Amostra	Tipo	Traço	Quantidade (CPs)
AB1	"Barra"	Tr1	6
AT1	"Tela"		6
AB2	"Barra"	Tr2	9
AT2	"Tela"		9
AB3	"Barra"	Tr3	6
AT3	"Tela"		6
AB1-E	"Barra"	Tr1	3*
AT1-E	"Tela"		3*
AB3-E	"Barra"	Tr3	3*
AT3-E	"Tela"		3*

Note: CPs com extensômetros (*)

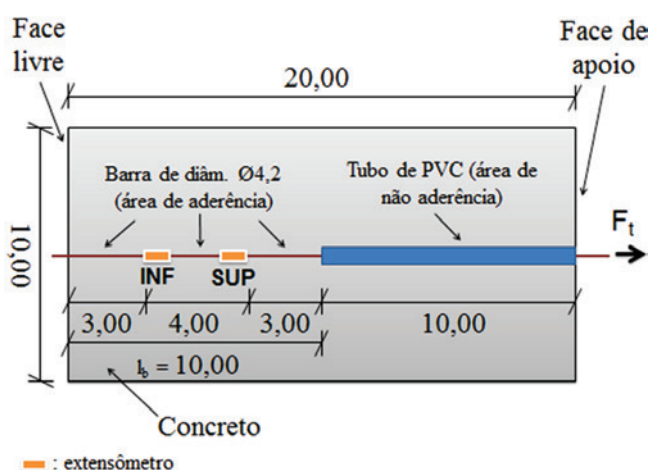
4.1 CPs do tipo "Barra"

O CP do tipo "Barra" está apresentado na Figura 1. A barra de aço é parcialmente imersa no centro do cilindro de concreto de diâmetro igual a 10,00 cm e de altura igual a 20,00 cm. O comprimento de ancoragem dentro do CP (l_b) vale 50% da altura do cilindro. O restante da barra dentro do cilindro é isolado do concreto com um tubo de PVC de comprimento igual a 10,00 cm. Conforme indicado por RILEM [19], o tubo de PVC foi colocado na zona que perturba (aumenta) a aderência devida à compressão do concreto na proximidade da face de apoio do cilindro. Vinte e um CPs do tipo "Barra" foram moldados (a repartição por traço é detalhada na Tabela 5). Além disso, para estudo das

deformações da barra ao longo do ensaio, seis CPs suplementares foram moldados, dotados cada um de dois extensômetros (Figura 2).

4.2 CPs do tipo "Tela"

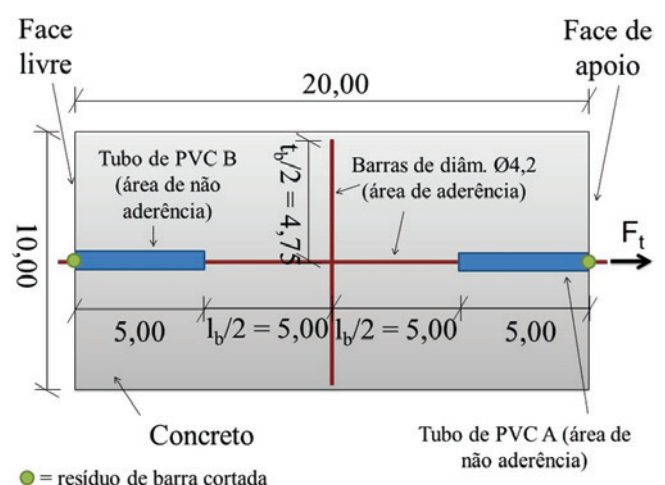
A armadura do CP do tipo "Tela" foi obtida a partir do corte de uma tela soldada do tipo CA-60 com malha quadrada (10,00 cm x 10,00 cm). O corte cuidadoso da malha não permitiu eliminar completamente as barras transversais indesejáveis para o ensaio, deixando sobrar uma pequena parte dessas barras ao nível da solda (ver "resíduo de barra cortada" na Figura 3). Para limitar a interferência desses resíduos na aderência entre a armadura e o concreto, a barra transversal foi colocada no centro do cilindro de concreto, de maneira a deixar os pontos de solda nas



Nota: l_b : comprimento de ancoragem longitudinal; F_t : força de arrancamento. Cotas em cm

Figura 2

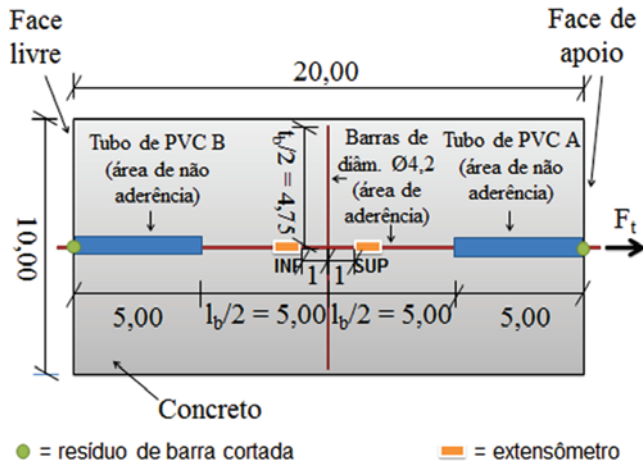
CP tipo "Barra" com extensômetros (corte longitudinal)



Nota: l_b : comprimento de ancoragem longitudinal; t_b : comprimento de ancoragem transversal; F_t : força de arrancamento. Cotas em cm

Figura 3

CP tipo "Tela" (corte longitudinal)



● = resíduo de barra cortada — = extensômetro
Nota: l_b = comprimento de ancoragem longitudinal; t_b = comprimento de ancoragem transversal; F_t = força de arrancamento. Cotas em cm

Figura 4
 CP tipo "Tela" com extensômetros (corte longitudinal)

extremidades do cilindro (Figura 3). Dois tubos de PVC de comprimento igual a 5,00 cm colocados nas extremidades do cilindro permitiram obter um comprimento de ancoragem longitudinal (l_b) igual a 10,00 cm. Além disso, o tubo colocado à proximidade da face de apoio (Figura 3, "tubo de PVC A") limita a influência da compressão do cilindro na medição da força de arrancamento (F_t). A barra transversal (t_b) tem um comprimento total de 9,50 cm. Vinte e um CPs do tipo "Tela" foram moldados (a repartição por traço é detalhada na Tabela 5). Além disso, para estudo das deformações da barra longitudinal ao longo do ensaio, seis CPs suplementares foram moldados, dotados cada um de dois extensômetros (Figura 4).

4.3 Identificação dos CPs e descrição das amostras

A Tabela 5 descreve as dez amostras da pesquisa.

4.4 Sistema de arrancamento

Os ensaios de arrancamento foram realizados com auxílio de uma prensa universal de capacidade igual a 1000 kN. A Figura 5 apresenta as diferentes partes do sistema de arrancamento. Para medição da força de arrancamento, foi utilizada uma célula de carga de capacidade igual a 10 tf. Para medição do deslizamento da armadura longitudinal dentro do cilindro de concreto, usou-se um LVDT fixado a uma base magnética. Utilizou-se um módulo de aquisição e um programa computacional para gravação dos dados.

4.5 Cálculo da tensão última de aderência

Para determinar a tensão última de aderência (τ_{bu}) dos CPs do tipo "Barra", foi dividida a força de tração máxima aplicada durante o ensaio (F_{tu}) pela área de contato entre o concreto e a armadura dentro do cilindro (área de aderência, valendo $\pi \cdot \varnothing \cdot l_b$):

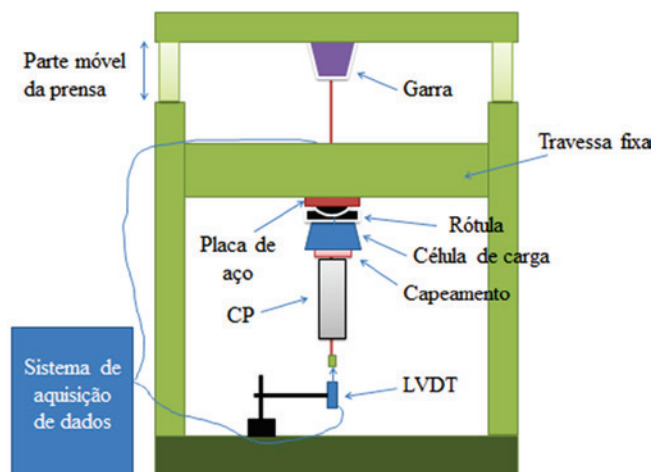
$$\tau_{bu} = 100 \cdot F_{tu} / (\pi \cdot \varnothing \cdot l_b) \tag{1}$$

onde τ_{bu} é a tensão última de aderência (MPa); F_{tu} é a força de tração máxima (kN); \varnothing é o diâmetro nominal da barra (mm) e l_b é o comprimento de ancoragem da barra (cm).

5. Resultados e discussão

5.1 Força última de arrancamento (F_{tu}) e tensão última de aderência (τ_{bu})

A Tabela 6 e a Tabela 7 resumem os principais resultados quantitativos da pesquisa. Para os CPs do tipo "Barra", a redução de γ_{28} provoca uma forte diminuição de F_{tum} : observa-se uma diminuição de 6,00 kN (92 %) entre as amostras AB1 e AB2, e de 6,36 kN (98 %) entre as amostras AB1 e AB3. Para a tensão última de aderência média ($\tau_{b,m}$), as mesmas observações podem ser feitas: diminuição de 4,54 MPa (92 %) entre AB1 e AB2, e diminuição de 4,81 MPa (98 %) entre AB1 e AB3. O aumento da resistência ao arrancamento (F_{tum}) provocado pela introdução da barra transversal no meio do cilindro de concreto aumenta junto com a diminuição de γ_{28} : observa-se um aumento de 3,64 kN (56 %) entre as amostras AB1 e AT1, um aumento de 4,91 kN (982 %) entre as amostras AB2 e AT2, e um aumento de 2,83 kN (2021 %) entre as amostras AB3 e AT3. Para as amostras AB1-E e AB3-E, a presença dos extensômetros interferiu na zona de aderência, impossibilitando a medição de l_b e, portanto, o cálculo de τ_{bu} . Assim, para os CPs dessas amostras (AB1-E e AB3-E), os resultados quantitativos não são considerados na pesquisa. A respeito das amostras do tipo "Tela", observa-se uma redução de 0,36 kN (4 %) entre as amostras AT1 e AT1-E, e de 0,41 kN (14 %) entre as amostras AT3 e AT3-E. Sendo assim, mesmo que o comprimento de ancoragem longitudinal (l_b) seja reduzido pela colocação dos extensômetros, os resultados quantitativos obtidos com as amostras AT1-E e AT3-E foram considerados nesta pesquisa.



Nota: croqui sem escala

Figura 5
 Sistema de arrancamento (elevação)

Tabela 6

Resultados quantitativos (parte 1/2)

Amostra	CP	l_b (cm)	F_{tu} (kN)	F_{tum} (kN)	τ_{bu} (MPa)	τ_{bum} (MPa)
AB1	1	10,10**	5,38	6,50	2,48	4,92 (CV = 9,65 %)
	(CV = 9,00 %)	4,04	1,58		2,46	
	2	9,94**	6,84		5,22	
	3	10,09**	6,33		4,75	
	4	9,93**	6,90		5,27	
	5	9,94**	6,87		5,24	
AT1	1	10,08**	9,84	10,14 (CV = 2,23 %)	-	-
	2	10,11**	10,13		-	
	3	10,07**	9,95		-	
	4	10,37**	10,48		-	
	5	10,07*	10,21		-	
	6	10,09**	10,24		-	
AT1-E	1	10,15*	9,68	9,78 (CV = 2,48 %)	-	-
	2	10,10*	9,61		-	
	3	10,14*	10,06		-	
AB2	1	9,99**	0,29	0,50 (CV = 63,69 %)	0,22	0,38 (CV = 63,49 %)
	2	10,00**	0,91		0,69	
	3	9,95**	0,43		0,33	
	4	10,04**	0,86		0,65	
	5	10,07**	0,86		0,65	
	6	10,02**	0,44		0,33	
	7	10,06**	0,09		0,07	
	8	10,05**	0,55		0,41	
	9	10,00**	0,09		0,07	
AT2	1	10,11*	5,25	5,41 (CV = 6,54 %)	-	-
	2	10,02*	5,03		-	
	3	10,14*	5,53		-	
	4	10,10*	5,54		-	
	5	10,08*	5,55		-	
	6	10,16*	5,39		-	
	7	9,91**	4,83		-	
	8	10,01*	6,07		-	
	9	10,16*	5,54		-	

Nota: l_b = comprimento de ancoragem; $F_{tu(m)}$ = força de tração última (média); $\tau_{bu(m)}$ = tensão última (média) de aderência; CV = coeficiente de variação, Comprimento l_b medido na armadura antes do ensaio (*) ou no concreto após o ensaio e abertura do cilindro de concreto (**)

Tabela 7

Resultados quantitativos (parte 2/2)

Amostra	CP	l_b (cm)	F_{tu} (kN)	F_{tum} (kN)	τ_{bu} (MPa)	τ_{bum} (MPa)
AB3	1	9,81**	0,09	0,14 (CV = 87,48 %)	0,07	0,11 (CV = 84,20 %)
	2	10,03**	0,09		0,07	
	3	10,00**	0,09		0,07	
	4	10,11*	0,09		0,07	
	5	9,95**	0,09		0,07	
	6	9,98**	0,39		0,29	
AT3	1	10,14*	2,81	2,97 (CV = 6,58 %)	-	-
	2	9,86**	2,88		-	
	3	10,07*	3,15		-	
	4	10,15*	2,82		-	
	5	10,00*	3,27		-	
	6	10,08**	2,86		-	
AT3-E	1	10,10**	2,83	2,56 (CV = 10,96 %)	-	-
	2	10,01**	2,27		-	
	3	10,07**	2,59		-	

Nota: l_b = comprimento de ancoragem; $F_{tu(m)}$ = força de tração última (média); $\tau_{bu(m)}$ = tensão última (média) de aderência; CV = coeficiente de variação. Comprimento l_b medido na armadura antes do ensaio (*) ou no concreto após o ensaio e abertura do cilindro de concreto (**)

5.2 Modos de ruptura

5.2.1 Modos de ruptura das amostras AB1, AB2 e AB3

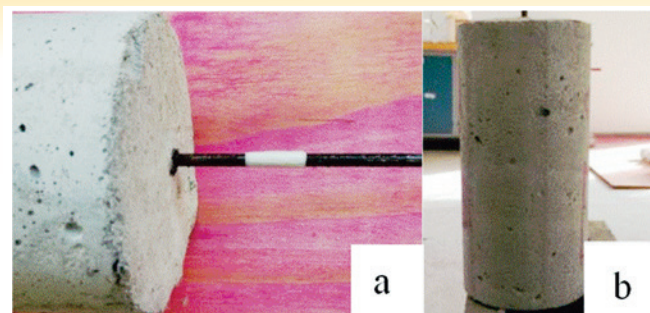
Para 100 % das amostras AB1, AB2 e AB3, o ensaio não provocou o aparecimento de fissuras nos cilindros de concreto, a ruptura dos CPs ocorreu por deslizamento da armadura (Figura 6). Na amostra AB2, três CPs (33 %) tiveram o deslizamento provocado unicamente pela pré-carga (P) necessária para fixar o CP na prensa. A mesma observação foi feita para 100 % dos CPs da amostra AB3.

5.2.2 Modo de ruptura da amostra AT1

Na amostra AT1, seis CPs (100 %) romperam ao nível da armadura, fora do cilindro de concreto (Figura 7-a e 7-b) sem provocar a fissuração dos cilindros de concreto (Figura 7-c).

5.2.3 Modos de ruptura das amostras AT2 e AT3

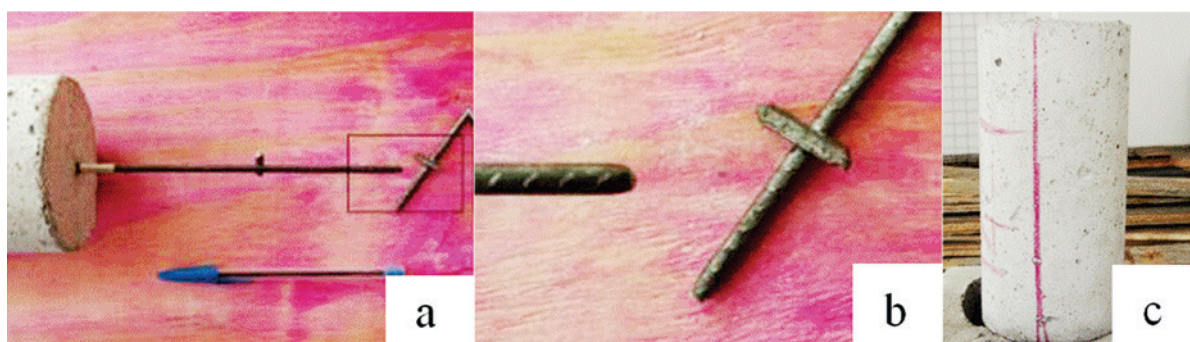
Na amostra AT2, sete CPs (78 %) romperam por deslizamento da



Nota: deslizamento da armadura (a) sem fissuração do cilindro de concreto (b)

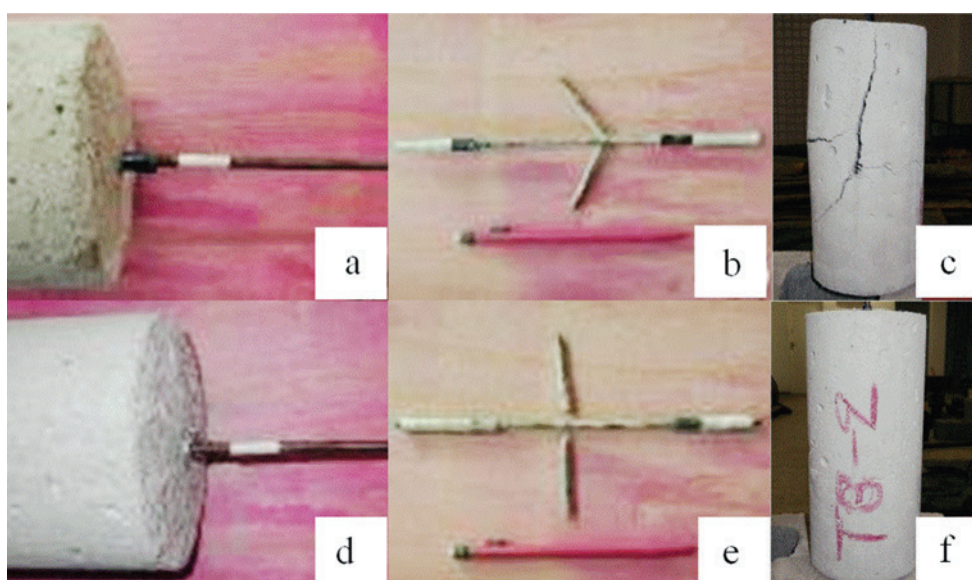
Figura 6
Modo de ruptura das amostras AB1, AB2 e AB3

barra longitudinal com dobramento da barra transversal (Figura 8-a e 8-b), provocando a fissuração longitudinal e transversal do cilindro de concreto (Figura 8-c). Para os dois CPs restantes (22 %), a ruptura aconteceu ao nível da solda ligando a barra



Nota: armadura rompida fora do CP (a, b) sem alteração do cilindro de concreto (c)

Figura 7
Modo de ruptura da amostra AT1

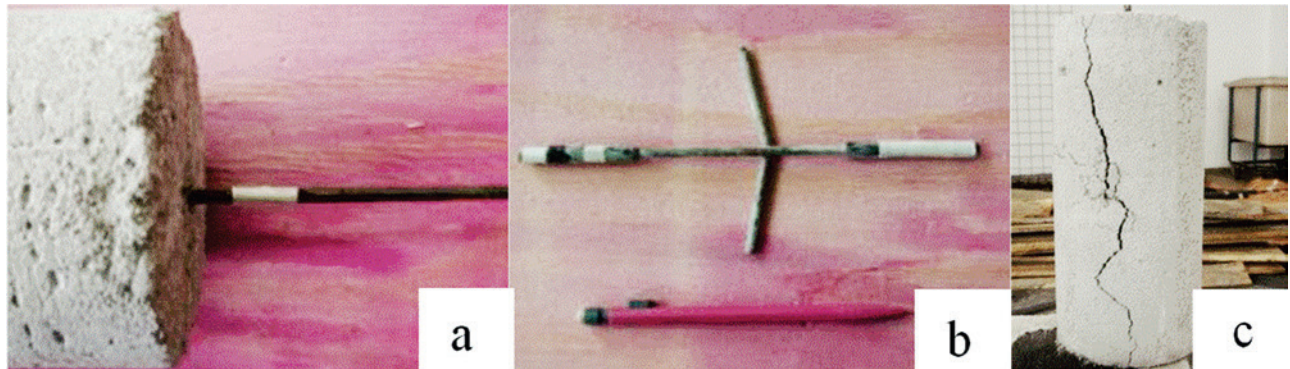


Nota: para 78% da amostra, deslizamento da barra longitudinal com dobramento da barra transversal (a, b) provocando a fissuração longitudinal e transversal do cilindro de concreto (c). Para 22% da amostra, ruptura ao nível da solda ligando a barra longitudinal com a barra transversal (d, e), sem provocar fissuras no cilindro de concreto (f)

Figura 8
Modos de ruptura da amostra AT2

longitudinal com a barra transversal (Figura 8-d e 8-e), sem provocar fissuras no cilindro de concreto (Figura 8-f). Na amostra AT3, seis CPs (100 %) romperam por deslizamento da barra longitudinal com dobramento da barra transversal (Figura 9-a e 9-b) provocando também a fissuração longitudinal e trans-

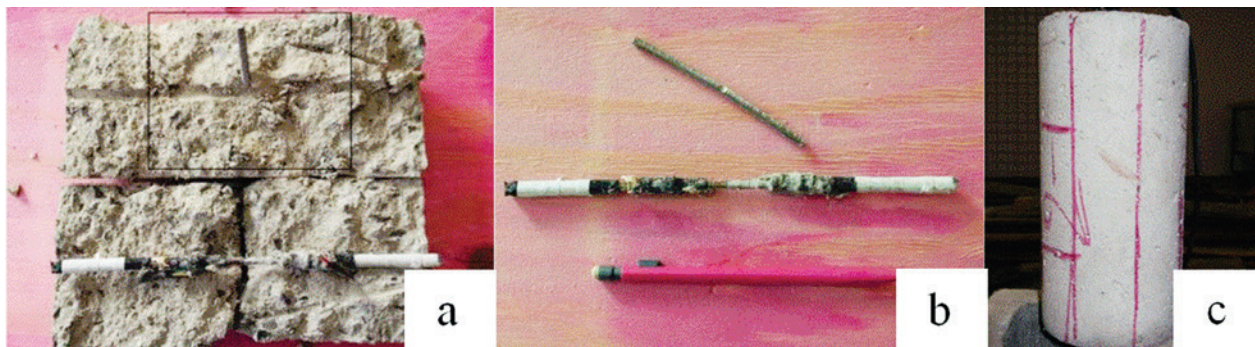
versal do cilindro de concreto (Figura 9-c). Em comparação com a amostra AT2, os CPs da amostra AT3 apresentaram um dobramento menos pronunciado (comparar a Figura 8-b e a Figura 9-b), o que confirma a diminuição da resistência ao arrancamento da armadura transversal do concreto quando γ_{28} é



Nota: deslizamento da barra longitudinal com dobramento da barra transversal (a, b) provocando a fissuração longitudinal e transversal do cilindro de concreto (c)

Figura 9

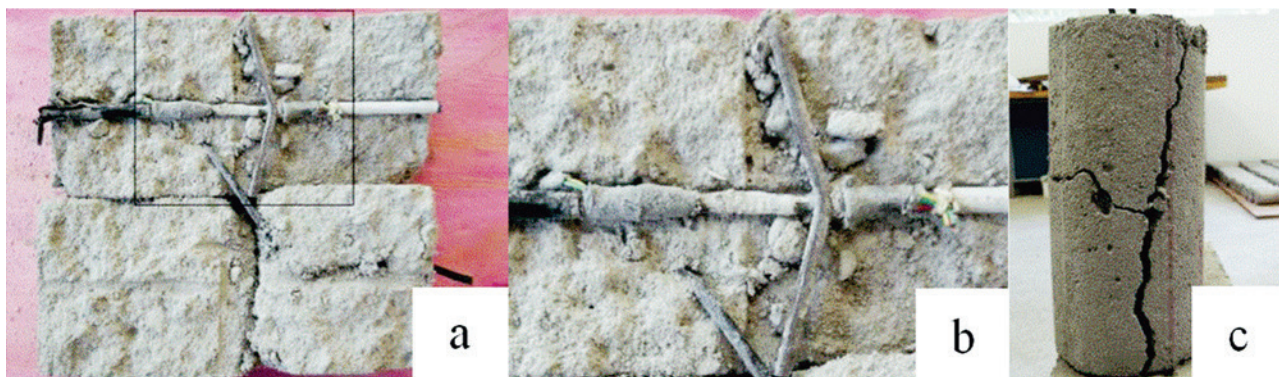
Modo de ruptura da amostra AT3



Nota: ruptura ao nível da solda entre a barra longitudinal e a barra transversal (a, b), sem fissuração do cilindro de concreto (c)

Figura 10

Modo de ruptura da amostra AT1-E



Nota: deslizamento da barra longitudinal com dobramento da barra transversal (a, b), com fissuração longitudinal e transversal do cilindro de concreto (c)

Figura 11

Modo de ruptura da amostra AT3-E

rabaixado (quando a taxa de agente espumígeno no traço de concreto celular aumenta).

5.2.4 Modo de ruptura da amostra AT1-E

Para os três CPs (100 %) da amostra AT1-E, a ruptura ocorreu ao nível da solda entre a barra longitudinal e a barra transversal (Figura 10-b), e não fora do cilindro como no caso dos CPs da amostra AT1 (Figura 7-a e 7-b). Como indicado na Figura 10-c, notou-se também que os cilindros não sofreram nenhuma fissuração (situação idêntica aos CPs da amostra AT1, ver Figura 7-c).

5.2.5 Modo de ruptura da amostra AT3-E

Para os três CPs (100 %) da amostra AT3-E, o modo de ruptura foi idêntico ao da amostra AT3: a ruptura ocorreu por deslizamento da barra longitudinal com dobramento da barra transversal (Figura 11-a e 11-b). Também, como no caso da amostra AT3, os cilindros da amostra AT3-E fissuraram longitudinalmente e transversalmente (Figura 11-c).

5.3 Diagramas F_t - Δ

Os diagramas da Figura 12 apresentam a evolução da força de tração aplicada (F_t) em função do deslocamento da barra longitudinal (Δ) e do tipo de amostra. Cada diagrama corresponde à média dos resultados da amostra considerada.

5.3.1 Diagramas F_t - Δ das amostras AB1, AB2 e AB3

O diagrama obtido para a amostra AB1 é característico de uma ruptura por deslizamento da armadura dentro do cilindro: observe-se um suave decréscimo da curva após a força de tração máxima (F_{tu}) ser atingida. Este modo de ruptura é coerente com as observações visuais realizadas após os ensaios (ver item 5.2.1). O diagrama médio da amostra AB2 confirma o forte decréscimo da aderência observado nos resultados quantitativos (ver item 5.1). Para os seis CPs (100 %) da amostra AB3, o deslizamento da barra ocorreu após a aplicação da pré-carga (P), impossibilitando a obtenção do diagrama médio.

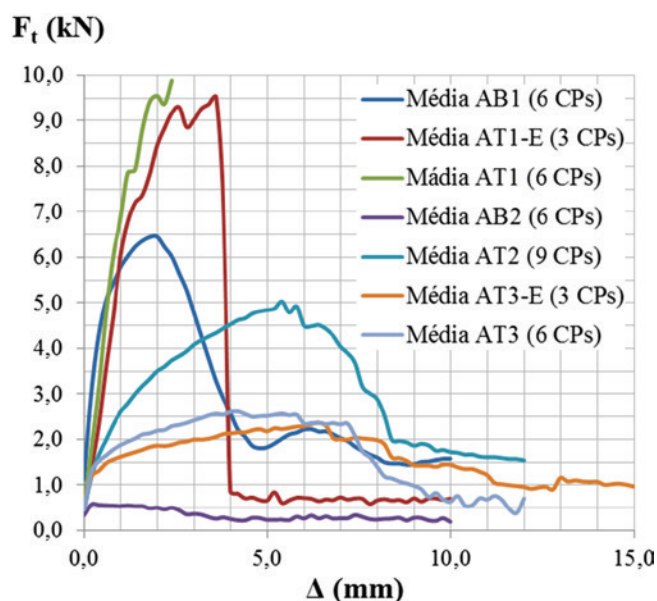


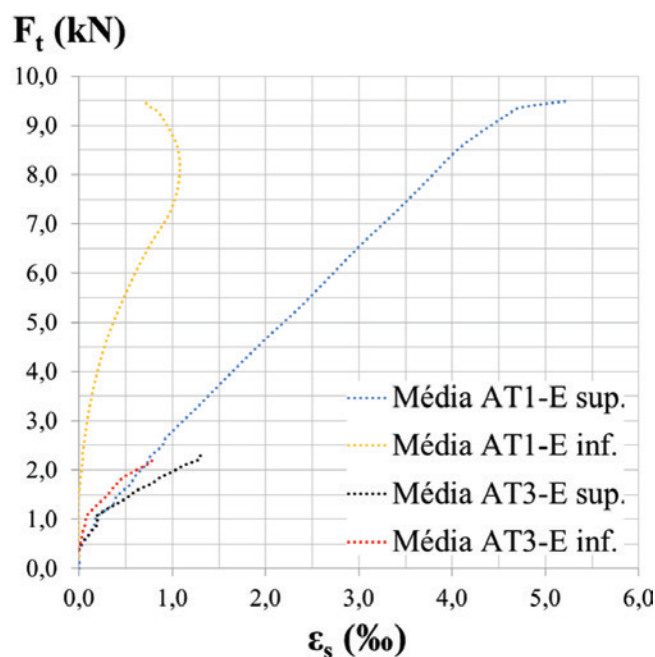
Figura 12
Diagramas F_t - Δ

5.3.2 Diagramas F_t - Δ das amostras AT1 e AT1-E

Para os seis CPs (100%) da amostra AT1, a ruptura ocorreu ao nível da barra longitudinal, fora do cilindro de concreto (ver item 5.2.2). A saída do LVDT do eixo da barra longitudinal provocado pela ruptura súbita da mesma não permitiu obter o diagrama médio completo da amostra AT1: o diagrama é apresentado unicamente até o ponto de tração máxima (F_{tu}). Para a amostra AT1-E, apesar de observar também uma ruptura de tipo frágil para 100% dos casos (ruptura ao nível da solda entre a barra longitudinal e a barra transversal, ver item 5.2.4), em nenhum caso observou-se a saída do LVDT do eixo da barra longitudinal. Assim, para a amostra AT1-E, foi possível construir o diagrama F_t - Δ completo. Até atingir o valor F_{tu} , nota-se a relativa semelhança entre o diagrama da amostra AT1 e o da amostra AT1-E. Assim, conclui-se que, apesar de reduzir o comprimento de ancoragem longitudinal, no caso da amostra AT1-E, a presença dos extensômetros não interferiu de forma significativa nos resultados.

5.3.3 Diagramas F_t - Δ das amostras AT2 e AT3

Para sete CPs (78%) da amostra AT2, a ruptura ocorreu por esmagamento do concreto devido ao deslocamento das barras longitudinal e transversal dentro do cilindro (ver item 5.2.3). Para dois CPs (22%), a ruptura ocorreu ao nível da solda (ver item 5.2.3). Assim, o diagrama médio da amostra AT2 apresentado na Figura 12 é mais representativo do modo de ruptura por esmagamento do concreto (78% dos casos) que por ruptura da solda (22% dos casos). Comparando o diagrama médio da amostra AT2 com o da amostra AT1, observa-se uma forte diminuição de F_{tu} (força máxima) e um aumento de Δ_u (deslocamento correspondente a F_{tu}), revelando a diminuição da resistência ao arrancamento da armadura e da rigidez do concreto, quando o agente espumígeno é introduzido no concreto. Para seis CPs (100%) da amostra AT3, o modo de ruptura também ocorreu por esmagamento do concreto. Comparando com o diagra-



Nota: extensômetro inferior; sup. = extensômetro superior. Ver Figura 4 para posicionamento dos extensômetros

Figura 13
Diagramas F_t - ε_s

ma da amostra AT2, observa-se uma diminuição de F_t , traduzindo a queda de resistência ao arrancamento quando aumenta a quantidade de agente espumígeno no concreto.

5.3.4 Diagrama F_t - Δ da amostra AT3-E

Para os três CPs (100%) da amostra AT3-E, a ruptura ocorreu, como no caso da amostra AT3, por esmagamento do concreto (devido ao deslocamento das barras longitudinal e transversal dentro do cilindro). A relativa semelhança entre o diagrama da amostra AT3-E e o da amostra AT3 demonstra que, apesar de reduzir o comprimento de ancoragem longitudinal, a presença dos extensômetros (caso da amostra AT3-E) não influenciou de forma significativa os resultados. Essa observação é coerente com as observações feitas nos itens 5.1 e 5.2.5.

5.4 Deformação das armaduras

A Figura 13 apresenta a evolução da força de tração (F_t) em função da deformação da barra longitudinal (ϵ_s) e do tipo de amostra. Os diagramas obtidos correspondem a valores médios. Vale ressaltar que um CP da amostra AT1-E sofreu um desligamento dos extensômetros durante o ensaio, portanto o diagrama F_t - ϵ_s desta amostra foi obtido a partir de dois CPs só (contra três para a amostra AT3-E). A Figura 13 permite comparar a deformação das barras das amostras AT1-E e AT3-E. Nota-se que a diferença de deformação máxima entre os extensômetros superior e inferior diminui junto com γ_{28} (por volta de 4 % para AT1-E e por volta de 0,5 % para AT3-E). Também, nota-se que para o mesmo nível de sollicitação (F_t), os extensômetros da amostra AT3-E se deformam mais que os da amostra AT1-E, o que confirma a diminuição da rigidez do concreto junto com γ_{28} .

6. Conclusões

Relembrando o objetivo principal deste trabalho, que consistiu em estudar o fenômeno de aderência entre o concreto celular e as barras de aço, este item contém as principais conclusões da investigação. Entre $\gamma_{28} = 2255 \text{ kg/m}^3$ (concreto convencional) e $\gamma_{28} = 1565 \text{ kg/m}^3$ (concreto celular) a tensão última de aderência sofreu uma redução de 92 % e entre 2255 kg/m^3 (concreto convencional) e 1510 kg/m^3 (concreto celular), a mesma sofreu uma redução de 98 %. Assim, esta pesquisa revelou a influência do agente espumígeno na forte diminuição da aderência entre as barras de aço de diâmetro igual a 4,2 mm e os concretos celulares com $\gamma_{28} = 1565$ e 1510 kg/m^3 . Portanto, para aplicações estruturais, o estudo da aderência entre o concreto celular e as barras de aço é imprescindível. Analisando o tipo de ancoragem, notou-se que o aumento da aderência (F_{tum}) devido à presença da barra transversal cresceu junto com o rebaixamento de γ_{28} . Com $\gamma_{28} = 2255 \text{ kg/m}^3$ (concreto convencional), a barra transversal permitiu aumentar F_{tum} de 56 %, com $\gamma_{28} = 1565 \text{ kg/m}^3$ (concreto celular) o aumento foi de 982 % e com $\gamma_{28} = 1510 \text{ kg/m}^3$ (concreto celular) o aumento foi de 2021 %. Com a presença da barra transversal notou-se uma variação do modo de ruptura entre o concreto convencional (ruptura da armadura fora do cilindro) e os concretos celulares (arrancamento da armadura sem ruptura do aço, na maioria dos casos), o que limita

a conclusão ao caso dos concretos celulares. Sendo, assim, pode-se concluir que, o ganho de aderência proporcionado pela barra transversal aumenta no concreto celular quando γ_{28} é rebaixado. Portanto, essa pesquisa revelou que ancoragens especiais (não exclusivamente retas) como, por exemplo, barras transversais, têm um desempenho mecânico acrescido à medida que a massa específica do concreto celular é rebaixada (à medida que a taxa de incorporador de ar no traço aumenta).

Esta última observação encoraja a utilização de ancoragens especiais nas peças estruturais feitas com concreto celular. Essa ancoragem é corriqueiramente obtida com a utilização de telas que têm as barras transversais e longitudinais soldadas entre si. Portanto, existe uma grande preocupação com a ancoragem de barras retas em concretos celulares, que pode ser resolvida com o uso de telas.

7. Agradecimentos

Os autores agradecem à empresa Gethal® pela doação de materiais e apoio financeiro assim como à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão de bolsa de Mestrado para o primeiro co-autor citado.

8. Referências bibliográficas

- [1] CARVALHO, R. C.; FIGUEIREDO FILHO, J. R. Cálculo e detalhamento de estruturas usuais de concreto armado: segundo a NBR 6118: 2003. 3. ed. São Carlos: Ed. UFSCar, 2007. 368 p.
- [2] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. NBR 8953: concrete for structural use - density, strength and consistence classification. Rio de Janeiro: ABNT, 2015. 3 p.
- [3] ROSSIGNOLO, J. A. Concreto leve estrutural: produção, propriedades, microestruturas e aplicações. São Paulo: Pini, 2009. 144 p.
- [4] FERREIRA, O. A. R. Concretos celulares espumosos. São Paulo: Departamento de Engenharia Construção Civil da EPUSP, 1987. 20 p. Boletim técnico.
- [5] TEIXEIRA FILHO, F. J.; TEZUKA, Y. Considerações sobre algumas propriedades dos concretos celulares espumosos. São Paulo: Escola Politécnica da USP, Departamento de Engenharia de Construção Civil, 1992. 29 p. Boletim técnico.
- [6] PETRUCCI, E. G. R. Concreto de cimento Portland. 5. ed. Porto Alegre: Globo, 1978. 307 p.
- [7] FUSCO, P. B. Técnica de armar as estruturas de concreto. São Paulo: Pini, 1995. 382 p.
- [8] LEONHARDT, F.; MÖNNIG, E. Construções de concreto, volume 1: princípios básicos do dimensionamento de estruturas de concreto armado. Tradução de: David Fridman. Rio de Janeiro: Interciência, 1977. 336 p.
- [9] PIYAMAİKONGDECH, A. Ductile lightweight concrete for lightweight structural application. 2007. 183 f. Thesis (Master of Science) - Faculty of the Graduate School, University of Texas, Arlington, 2007.
- [10] OLIVEIRA, K. R. de S. Aderência da armadura ao concreto leve com adição de resíduos. 2006. 198 f. Dissertação

- (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2006.
- [11] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. NBR NM 52: fine aggregate - determination of the bulk specific gravity and apparent specific gravity. Rio de Janeiro: ABNT, 2009. 6 p.
- [12] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. NBR NM 45: aggregates - determination of the unit weight and air-void contents. Rio de Janeiro: ABNT, 2006. 8 p.
- [13] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. NBR NM 248: aggregates - sieve analysis of fine and coarse aggregates. Rio de Janeiro: ABNT, 2003. 6 p.
- [14] LIMA, T. L. Estudo das propriedades físicas e mecânicas do concreto celular estrutural. 2015. Dissertação (Mestrado) - Curso de Estruturas e Construção Civil, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2015. Dissertação em andamento.
- [15] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. NBR 11578: Portland composite cement - specification. Rio de Janeiro: ABNT, 1991. 5 p.
- [16] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. NBR 5738: concrete - procedure for molding and curing concrete test specimens. Rio de Janeiro: ABNT, 2015. 9 p.
- [17] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. NBR NM 67: concrete - slump test for determination of the consistency. Rio de Janeiro: ABNT, 1998. 8 p.
- [18] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. NBR 5739: concrete - compression test of cylindrical specimens - method of test. Rio de Janeiro: ABNT, 2007. 9 p.
- [19] Réunion Internationale des Laboratoires d'Essais et de Recherches sur les Matériaux et les Constructions – RILEM. Recommandation RILEM/CEB/FIP RC 6: essais portant sur l'adhérence des armatures du béton. 2. Essai par traction. [s.l.]: [s.n.], 1978. 5 p.
- [20] SOUDAIS, P. R. N. Estudo da aderência entre o concreto celular e as barras de aço. 2014. 312 f. Dissertação (Mestrado), Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” (UNESP) - Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Ilha Solteira-SP, 2014.